بررسی ترمو اکونومیک خشک‌کن خورشیدی کابینتی با کلکتور لولهٔ خلأ و ذخیره‌کنندهٔ انرژی*

مقاله پژوهشی

محمدصالح برقی جهرمی[1] مسعود ایرانمنش[2] هادی صمیمی اخیجهانی[3]

چکیده *در این تحقیق تأثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM) در مخزن ذخیره‌کنندهٔ حرارت بر عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی بررسی شده است. آزمایش‌ها برای PCM در ۳سطح ۱/۵٤، ۲/٤٥، ۳/٦کیلوگرم و برای دبی سیال در ۲سطح ۰/۲ و ۰/٤لیتربردقیقه انجام شد. با افزایش دبی سیال بازده حرارتی جمع‌کننده از ۲۰/۲ تا ٦۲/٤درصد تغییر می‌کند. نتایج نشان داد تغییرات انرژی حرارتی برای دبی سیال ۰/۲ و ۰/٤لیتربردقیقه به‌ترتیب بین ۱۳/۳۱ تا ۱۳/٦۳ و ۱٤/٤٥ تا ۱٤/۹۲مگاژول به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد بازده کلی خشک‌کن با افزایش PCM افزایش یافته و تغییرات آن برای دبی ۰/۲لیتربردقیقه از ۳۲/۹۲ تا ۳۵/۵۵درصد و برای دبی ۰/٤لیتربردقیقه از ۳۲/۱۹ تا ۳٦/۰۲درصد است. باتوجه‌به مقادیر انرژی ویژه و بازده کلی خشک‌کن، دبی ۰/۲لیتربردقیقه با مقدار PCM به‌میزان ۳/٦کیلوگرم گزینهٔ مناسبی برای خشک‌کردن است. دورهٔ بازگشت سرمایه برای سامانه حدود ۲۰ماه به‌دست آمد.*

واژه های کلیدی انرژی خورشیدی، بازده حرارتی جمع‌کننده، دبی حجمی سیال، مواد تغییرفازدهنده.

مقدمه

از محورهای اصلی حوزهٔ انرژی، بازده انرژی سامانه‌های تأمین انرژی است. ایران کشوری است که در آن به‌دلیل فراوانی انرژی‌های فسیلی توجه کمتری به نحوه مصرف انرژی و بهینه‌سازی سامانه‌های مصرف‌کننده انرژی می‌شود. اما در دهه‌های گذشته باتوجه‌به روبه‌پایان‌بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی حاصل از مصرف این نوع سوخت‌ها، در سند جامع توسعهٔ کشور مقرر شده است تا سال ۱٤۳۰ باید دست‌کم ۳۰ درصد از شبکهٔ تولید برق، از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تأمین شود که از این میزان بیش از ۱۵درصد مربوط به انرژی خورشیدی خواهد بود. بنابراین طراحی و ساخت سامانه‌هایی که بتواند مستقل یا ترکیبی از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر بهره‌برداری کند، امری مهم و ضروری است [1]. انرژی خورشیدی از منابع مهم انرژی‌های نو بوده و به‌دلیل فراوانی و دردسترس‌بودن، بیشتر در مرکز توجه طراحان و مهندسان انرژی قرار گرفته است. ایران با قرارگرفتن در موقعیت جغرافیایی بین ۲۵ تا ٤۰درجهٔ شمالی و ٤۳ تا ۵۵درجهٔ شرقی و متوسط ۳۰۰روز آفتابی، از مستعدترین مناطق برای استفاده از تابش خورشیدی در زمینه‌های مختلف به‌ویژه خشک‌کردن است [2]. بیش از ۳۰درصد انرژی تولیدی در جهان در بخش کشاورزی مصرف می‌شود که حدود ۱۲درصد آن برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود [3]. محصول خشک‌شده به روش صنعتی به‌دلیل کیفیت خوب، قیمت مناسب‌تری دارد و کشاورزان نسبت به روش سنتی بیشتر به آن توجه می‌کنند. اما در این روش به‌دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی، هزینهٔ محصول خشک‌شده افزایش می‌یابد و قدرت خرید محصول کم می‌شود [4]. علاوه‌برآن، استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث به‌وجودآمدن مشکلات زیست‌محیطی مانند به‌وجود آمدن گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌شود [5].

*تاریخ دریافت مقاله ۹۹/۱/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱۰/۲۹ می‌باشد.
DOI: 10.22067/jacsm.2021.56640.0

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.
(۲) استادیار، گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.
(۳) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان. **Email:** h.samimi@uok.ac.ir

دراین‌بین، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی می‌تواند تا حد زیادی از مصرف سوخت‌های فسیلی در این حیطه جلوگیری کند و علاوه بر افزایش کیفیت محصول خشک‌شده، باعث کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی شود [6]. مشکل عمده‌ای که در زمینهٔ استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی وجود دارد، عملکرد پایین و بازده کم آن‌ها نسبت به انرژی حرارتی رسیده به خشک‌کن است. به این امر به‌ویژه در فصل برداشت به‌دلیل فراوانی و اتلاف بیش از حد محصول، بیشتر توجه شده است و کشاورزان تمایلی به استفاده از این نوع خشک‌کن‌ها در مقایسه با خشک‌کن‌های هوای داغ صنعتی پیدا نمی‌کنند. طولانی‌بودن و ناپیوستگی خشک‌شدن محصول پس از غروب آفتاب، باعث کاهش میزان انتقال جرم محصول در طول شب و حتی در برخی مناطق باعث بازگشت رطوبت به محصول می‌شود و بازده خشک‌کردن را کم می‌کند [4]. میزان انتقال جرم تحت‌تأثیر ٤شاخص دمای هوا، ضخامت محصول، سرعت و رطوبت نسبی هوای دمیده‌شده به محصول است که بهینه‌سازی سامانه نیز ممکن است تحت‌تأثیر این عوامل باشد [7]. در این راستا برای افزایش کارایی خشک‌کن‌های خورشیدی و بهبود عملکرد و بهینه‌سازی آن‌ها، تحقیقات متعددی انجام شده است، مانند: استفاده از سامانه تحت خلأ [8]، ترکیب جمع‌کننده صفحهٔ تخت و متمرکزکنندهٔ سهموی [9]، متمرکزکننده‌های تابش خورشیدی [10]، ترکیب جمع‌کننده با پمپ حرارتی [11]، بهبود ساختار و ابعاد جمع‌کننده [12]، استفاده از سامانه PVT بین شیشه و صفحهٔ جاذب [13]، استفاده از منعکس‌کننده‌ها [1]، استفاده از صفحهٔ متخلخل در جمع‌کننده تخت [14]، استفاده از نانوسیال‌ها [15] و استفاده از جمع‌کننده با قابلیت تعقیب پرتوهای خورشید [16].

سیب (Malus domestica) یکی از محصولات باغی مهم در ایران به شمار می‌آید و ایران با تولید سالانه ۲/۷۹میلیون تن از انواع سیب‌ها مقام ششم را در جهان به خود اختصاص داده است [17] که علاوه بر مصرف داخلی به کشورهای منطقه نیز صادر می‌شود. خشک‌کردن سیب به روش سنتی همان‌طور که اشاره شد، کیفیت مناسبی ندارد و استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی با روش‌های ترکیبی می‌تواند تا حد زیادی به بهبود کیفیت و سرعت خشک‌شدن محصول کمک کند. خشک‌کن خورشیدی کابینتی مجهز به جمع‌کننده لوله خلأ و مخزن ذخیره‌کننده انرژی حرارتی یکی از روش‌های مناسب برای تسریع روند خشک‌کردن، افزایش کیفیت محصول و عملکرد سامانه است. جمع‌کننده لوله خلأ به‌دلیل دوجداره‌بودن و شکل دایره‌ای، امکان جذب تشعشع خورشیدی در شدت تابش‌های کم (حتی در زمستان) در طول روز را دارد و به‌دلیل جدابودن لوله‌ها از همدیگر قابلیت نگهداری با هزینه اندک را فراهم می‌کند [15,18]. بازده حرارتی این نوع جمع‌کننده‌ها به‌اندازه ٤٠ تا ٢٥ درصد بیشتر از نوع صفحه‌تخت [19] و ۸ درصد بیشتر از نوع Uشکل تخمین زده شده است [20]. استفاده از این نوع جمع‌کننده‌ها در انواع مختلف خشک‌کن‌های خورشیدی صورت گرفته [21-23] و عملکرد آن‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین بهبود پیدا کرده است [24-26]. یکی‌دیگر از راه‌های افزایش میزان بازدهی خشک‌کن‌های خورشیدی، استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM) در مخازن ذخیره‌کننده انرژی حرارتی است که با افزایش زمان انرژی‌دهی در سامانه، باعث کاهش زمان خشک‌شدن محصول می‌شود. گزارش ارائه‌شدهٔ آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای فرایندهایی که تغییرات درجه حرارت سامانه بین ۲۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس باشد، بسیار مؤثر است و تا حد زیادی باعث ذخیره‌سازی انرژی در سامانه می‌شود [27]. در طول روز با افزایش شدت تابش خورشید، انرژی حرارتی جذب‌شدهٔ جمع‌کننده در سیال و مواد تغییرفازدهنده ذخیره می‌شود و با غروب خورشید، سیال و مواد تغییرفازدهنده انرژی حرارتی خود را برای ادامه روند خشک‌شدن در اختیار خشک‌کن قرار می‌دهند. محققان بسیاری از مواد تغییرفازدهنده برای سامانه‌های مختلف حرارتی بهره گرفته‌اند: استفاده از PCM در خشک‌کن‌های خورشیدی

[28-31] به‌عنوان جذب‌کننده حرارت در صنعت ساختمان [32]، به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی در طول صفحات موازی [33]، در طراحی یک دودکش خورشیدی [34] و در طراحی گرم‌کن خورشیدی [35,36]. علاوه‌برآن، تحقیقات عمده‌ای در زمینهٔ مدل‌سازی و اصول طراحی سامانه‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی خورشیدی با استفاده از PCM انجام شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به مدل‌سازی ریاضی PCM در کورهٔ خورشیدی برای خشک‌کردن چوب [9]، بررسی استفاده از کپسول‌های PCM در داخل سیال و مدل‌سازی آن [37]، مدل‌سازی ریاضی رفتار PCM در مخزن ذخیره‌کننده [38] و بررسی چگونگی رفتار مخرن و مواد PCM در یک مبدل حرارتی [39] اشاره کرد.

کرمان یکی از استان‌های وسیع ایران است که محصولات میوه‌ای زیادی مانند سیب از شهرهای مختلف این استان به عمل می‌آید. شهر کرمان نیز به‌عنوان مرکز استان، بسیاری از کارخانجات فراوری و بسته‌بندی محصولات باغی را در خود جای داده است. این شهر با قرارگرفتن در موقعیت جغرافیایی ۵۱/٦ درجهٔ شرقی و ۳۵/٤درجهٔ شمالی و تابش سالانه به‌میزان ۷۰۰۰ کیلوکالری بر مترمربع، منطقهٔ مناسبی برای ایجاد تجهیزات خورشیدی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی است. علاوه‌برآن، ترکیب ۲ سامانهٔ جمع‌کنندهٔ لوله‌تحت خلأ و منبع ذخیره‌کننده همراه با PCM می‌تواند تا حدودی بازده حرارتی سامانه خشک‌کن را افزایش دهد و کشاورزان را به استفاده از این نوع خشک‌کن‌ها تشویق کند. بدین منظور باید مقدار PCM قرار داده شده در سامانه و سرعت جریان سیال در سامانه، طوری به‌دست آورده شود که بتواند در زمان مورد نیاز، میزان حرارت لازم را برای سامانهٔ خشک‌کن فراهم کند. در این حالت باید درجه حرارت درونی خشک‌کن بیشتر از درجه حرارت محیط اطراف باشد. باتوجه‌به بررسی‌ها، مطالعات اندکی درباره تأثیر استفادهٔ ترکیبی از مواد تغییرفازدهنده و جمع‌کننده‌های لولهٔ خلأ با خشک‌کن‌های خورشیدی انجام شده است. بنابراین در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، همچنین روند خشک‌شدن محصول با استفاده از ورقه‌های سیب ارزیابی شده و بازده حرارتی مخزن ذخیره‌کننده و بازده خشک‌کن به‌دست آورده شده است و مقدار حجم مورد نیاز و دبی جرمی مناسب برای بالاترین بازده حرارتی معرفی می‌شود.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن استفاده‌شده در این تحقیق خشک‌کنی کابینتی شامل یک جمع‌کننده خورشیدی لولهٔ خلأ، منبع ذخیره‌کننده همراه با PCM، مبدل حرارتی، فن الکتریکی و کابینت خشک‌کن است. جمع‌کننده لوله خلأ (SK-H15-45) شامل ۱۵لولهٔ دوجداره به‌طول ۱۸۰۰میلی‌متر، با مساحت مؤثر ۱/۹مترمربع با جذب‌کننده مسی به‌قطر داخلی و خارجی ٤٥ و ٥٨میلی‌متر است [48]. منبع ذخیره‌کننده سیال یک مخزن استوانه‌ای از جنس استیل به‌قطر ٥٠٠میلی‌متر، ارتفاع ٦٠٠میلی‌متر و ضخامت ۲میلی‌متر است که با پشم شیشه به‌ضخامت ٤٠میلی‌متر عایق‌بندی شده است. PCM استفاده‌شده در این تحقیق پارافین بود که در داخل یک لولهٔ مسی مارپیچ قرار داده شد. همهٔ داده‌برداری‌ها از ساعت۸ صبح شروع شده و تا ساعت٢٤ ادامه پیدا کرده است. برای سازگاری دستگاه با محیط و رسیدن به وضعیت پایدار، یک ساعت قبل از داده‌برداری، دستگاه در معرض تابش خورشید قرار داده شد. با افزایش شدت تابش خورشیدی میزان جذب جمع‌کننده افزایش یافته است و به‌تبع آن دمای سیال افزایش پیدا می‌کند که بخشی از آن در سیال انتقال‌دهنده و PCM ذخیره شده است و بخشی دیگر از طریق مبدل وارد سامانه خشک‌کن می‌شود. با گذشت زمان و کاهش شدت تابش خورشیدی از ساعت۲۰ به بعد، مسیر حرکت سیال به‌سمت جمع‌کننده بسته می‌شود و سیال فقط با جریان‌یافتن بین منبع ذخیره‌کننده و مبدل حرارتی، حرارت مورد نیاز برای خشک‌کردن محصول را تأمین می‌کند. جزئیات کامل مربوط به خشک‌کن خورشیدی

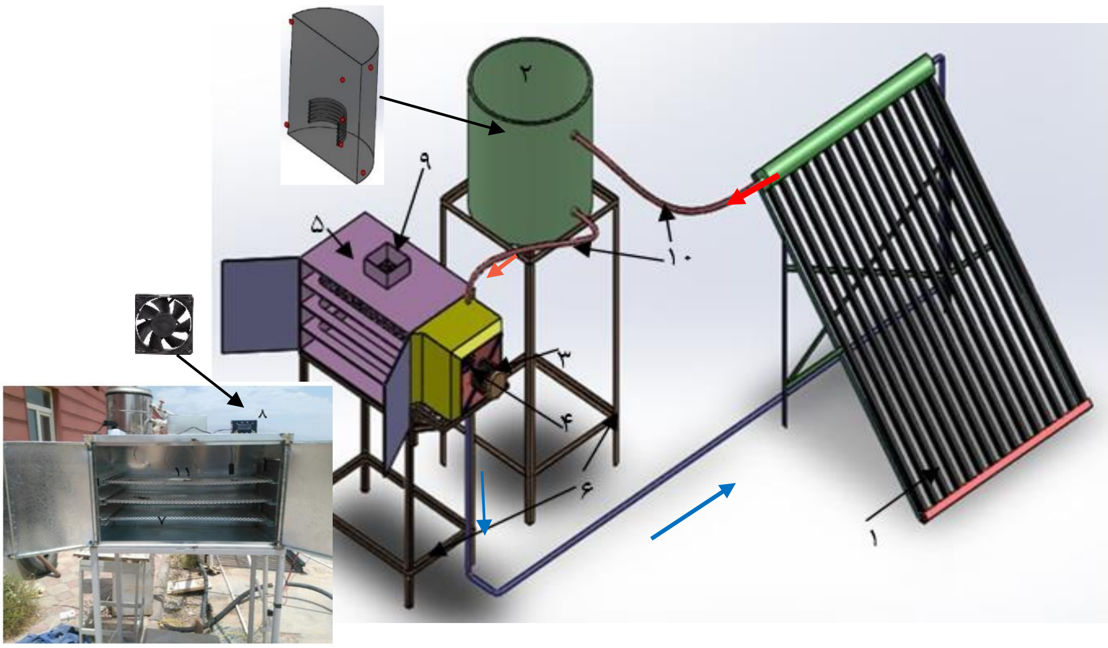
در شکل (۱) نمایش داده شده است.

آزمایش‌ها برای ۳وزن ۱/۵۴ و ۲/۴۵ و ۳/۶کیلوگرم از مواد PCM و ۲دبی حجمی ۰/۲ و ۰/۴لیتربردقیقه از سیال در نظر گرفته شد. دبی جرمی هوای دمیده‌شده به خشک‌کن نیز ۰/۰۲۵کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش خشک‌شدن محصول، از ورقه‌های سیب به‌ضخامت ۵میلی‌متر استفاده شد. برای به‌دست‌آوردن رطوبت اولیهٔ نمونه‌های سیب، ۱۸۰گرم از نمونه‌ها در ٤تکرار در آون با دمای ۲ ± ۱۰۵درجهٔ سلسیوس به‌مدت ۵ساعت قرار داده شد. میانگین رطوبت اولیهٔ نمونه‌ها ۱±۸۳/۹درصد به‌دست آمد. برای هر آزمایش ۱۵۰۰گرم از ورقه‌های سیب روی سینی‌ها پهن و داخل خشک‌کن قرار داده شد. تغییرات وزن محصول در حین خشک‌شدن با استفاده از ترازوی دیجیتال به‌ظرفیت ۱۵۰۰گرم و با دقت ۰/۰۵گرم گزارش می‌شد. نسبت رطوبت ورقه‌های سیب برای توصیف روند خشک‌شدن با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه شد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۱)$$

که در آن M_t، M_e و M_0 به‌ترتیب محتوای رطوبتی در هر لحظه، محتوای رطوبتی در حالت تعادل و محتوای رطوبتی اولیهٔ محصول (kg water/kg dry solid) هستند.

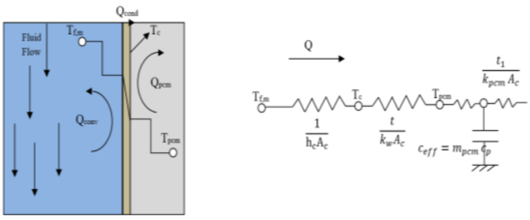
درجه حرارت قسمت‌های مختلف خشک‌کن با استفاده از ترموکوپل K قرائت شده است. همچنین سرعت هوای جاری در سامانه خشک‌کن و سرعت هوای محیط با استفاده از سرعت‌سنج مدل (Testo-454, Lutron, Taiwan) با دقت ۰/۱ متربرثانیه کنترل می‌شد. رطوبت هوای محیط نیز با استفاده از رطوبت‌سنج مدل (HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۳درصد اندازه‌گیری می‌شد. تمام آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان در ٦روز متوالی از ۱۲ تا ۱۸تیر۹٦ انجام شد.



شکل ۱ جزئیات مربوط به خشک‌کن خورشیدی کابینتی شامل: ۱) جمع‌کنندهٔ لولهٔ خلأ، ۲) مخزن ذخیرهٔ سیال، ۳) فن دمندهٔ هوا، ٤) مبدل حرارتی، ٥) کابینت خشک‌کن، ٦) شاسی، ٧) سینی نمونه، ٨) کنترلر فن الکتریکی، ٩) خروجی، ۱۰) لولهٔ انتقال سیال، ۱۱) ترموکوپل‌ها [47,48]

بازده جمع‌کننده خورشیدی

انرژی‌ای که در فرایند گرمادهی جذب می شود، شامل ۲قسمت است که قسمت اول ظرف حاوی مادهٔ PCM همان لولهٔ مارپیچ مسی و قسمت دوم پارافین است. در شکل (۲)، مدار حرارتی منبع ذخیره‌کننده انرژی شامل سیال، مادهٔ جاذب و پوستهٔ مادهٔ جاذب (مسی) نشان داده شده است. گرما با سیال از طریق همرفت به دیوارهٔ مسی و سپس از طریق هدایت، به پارافین داخل لولهٔ مارپیچ منتقل می شود. در این حالت حرارت منتقل شده از جمع‌کننده خورشیدی با سیال و پارافین ذخیره یا آزاد می‌شود.



شکل ۲ مدار انتقال حرارت برای سیال، لولهٔ مسی و پارافین به‌عنوان مادهٔ PCM

شار حرارتی جذب‌شده با سیال با استفاده از رابطهٔ (۲) مشخص می‌شود:

$$Q_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (۲)$$

شار حرارتی انتقال‌یافته بر اثر جریان همرفتی به دیوارهٔ مسی لولهٔ مارپیچی و شار حرارتی هدایت شده از لولهٔ مارپیچ به پارافین به‌صورت رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید [37]:

$$Q_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m})$$

$$Q_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (۳)$$

که در آن h_c ضریب انتقال حرارت همرفت است که با استفاده از عدد رینولدز و عدد ناسلت محاسبه می‌شود. $T_{f,m}$، $T_{c,m}$ و T_{pcm} به‌ترتیب درجه حرارت متوسط برای سیال، دیوارهٔ مسی و درجه حرارت PCM، k_w ضریب هدایت حرارتی مس و t_c ضخامت دیوارهٔ لولهٔ مسی مارپیچ است.

انرژی حرارتی جذب‌شده با PCM در فرایند جذب و دفع (آزادسازی) انرژی حرارتی (Q_{pcm}) با استفاده از رابطهٔ (٤) توصیف می‌شود [37-40]:

$$Q_{pcm} = m_{pcm} c_s (T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} < T_{melt}$$

$$Q_{pcm} = 0 \quad T_{pcm} = T_{melt}$$

$$Q_{pcm} = m_{pcm} c_l (T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} > T_{melt}$$

(٤)

c_l و c_s نشانگر ظرفیت گرمایی ویژه پارافین به‌ترتیب در حالت مایع و جامد است. در حالت اول دمای PCM کمتر از دمای ذوب، در حالت دوم برابر و در حالت سوم PCM به‌طور کامل مذاب است. بنابراین انرژی ذخیره و آزادشده از PCM در هر کدام از مراحل اشاره‌شده متفاوت خواهد بود. انرژی کل ذخیره‌شده از طریق سامانه از مجموع انرژی ذخیره شده در سیال و انرژی ذخیره‌شده در PCM حاصل می‌شود:

$$E_{st} = Q_f + Q_{pcm} \quad (۵)$$

همان‌طور که اشاره شد، پارافین از موادی است که در بلندمدت خواص فیزیکی و شیمیایی خود را بدون تخریب ساختار حفظ می‌کند و مناسب‌ترین ماده برای استفاده در سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی است. علاوه‌برآن، این ماده هیچ‌گونه اثر نامطلوبی بر سلامتی انسان ندارد و کاربر می‌تواند در آزمایش‌ها از دست برای قراردادن ماده در داخل لولهٔ مسی استفاده کند. خواص ترموفیزیکی پارافین در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی پارافین

ویژگی	مقدار
گرمای ویژه (kJ/kg K)	۲/۱
هدایت حرارتی (W/m K)	۰/۲
گرمای نهان (kJ/kg)	۱۶۶
ضریب انبساط حجمی (1/K)	۰/۰۰۰۵۶۱
چگالی (kg/m^3)	۷۸۳
دمای حالت مایع (K)	۳۲۵
دمای حالت جامد (K)	۳۱۷/۳

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در انتخاب جمع‌کننده برای یک فرایند گرمایی، بازده حرارتی است که عبارت است از انرژی حرارتی خروجی از جمع‌کننده به انرژی حرارتی (خورشیدی) رسیده به سطح جمع‌کننده. برای محاسبهٔ میزان انرژی رسیده به سطح جمع‌کننده از رابطهٔ (٦) استفاده می‌شود:

$$Q_u = AF_R([I_{b,T}(\tau\alpha)] - U_L(T_i - T_a)) \qquad (٦)$$

که در آن A سطح جمع‌کننده، F_R ضریب انتقال گرمای جمع‌کننده، $I_{b,T}$ شدت تابش خورشیدی، $\tau\alpha$ حا صل ضرب ضریب مؤثر عبور و ضریب جذب، T_a دمای محیط و T_i دمای خروجی سیال از جمع‌کننده است.

همچنین در رابطهٔ (٦)، U_l افت کلی از جمع‌کننده ا ست که برابر ا ست با مجموع ضریب افت حرارت از لولهٔ جاذب و ضریب افت حرارت از قسمت انتهای لوله.

بازده حرارتی محاسبه‌شده برای جمع‌کنندهٔ لولهٔ خلأ به صورت لحظه‌ای ا ست و با ا ستفاده از رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید [19].

$$\eta = \frac{Q_f}{AI_{b,T}} = \frac{\dot{m}c_p(T_{f,o} - T_{f,i})}{A\,I_{b,T}} \qquad (۷)$$

بازده خشک‌کن خورشیدی

برای توصیف چگونگی تأثیر استفاده از PCM و سامانه ذخیره‌کنندهٔ انرژی حرارتی در روند خشک‌شدن محصول، از بازده خشک‌کن استفاده شد. نسبت انرژی (حرارتی و مکانیکی) مصرف‌شده برای گرم‌کردن محصول و استخراج رطوبت از محصول (Q_m) به انرژی کل مصرف‌شده در فرایند خشک‌کردن شامل انرژی حرارتی سیال (Q_f) و انرژی مکانیکی (E_{mec}) است که به‌عنوان بازده خشک‌کن در نظر گرفته می‌شود [41].

$$\eta_{ef} = \frac{Q_m}{Q_f + E_{mec}} \qquad (۸)$$

انرژی لازم برای استخراج رطوبت از نمونه با درنظرگرفتن محتوای رطوبتی محصول و گرمای ویژهٔ محصول محاسبه می‌شود:

$$Q_m = w_d c_m(T_{m2} - T_{m1}) \qquad (۹)$$

گرمای ویژهٔ نمونه (c_m) را می‌توان از رابطهٔ (۱۰) به‌دست آورد:

$$c_m = 1465 + 3560(\frac{M_p}{1 + M_p})$$
$$M_p = (\frac{W_w - W_d}{W_d}) \qquad (۱۰)$$

که در رابطهٔ فوق W_w و W_d به‌ترتیب وزن رطوبت تبخیر شده از ماده و وزن مادهٔ خ شک شده به کیلوگرم است.

عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی با استفاده از پارامترهای زیادی ممکن است ارزیابی شود. معمولا از پارامتر میزان مصرف انرژی ویژه (SEC) [42] برای به‌دست‌آوردن انرژی مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلوگرم از محصول (سیب) استفاده می‌شود که با استفاده از رابطهٔ (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \qquad (۱۱)$$

که در آن W_o وزن نمونهٔ قراردادهشده در خشک‌کن به کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود.

بررسی اقتصادی سامانه خشک‌کن

علاوه بر آنالیز ترمودینامیکی خشک‌کن و بررسی عوامل مؤثر بر بازده حرارتی آن، لازم است به‌لحاظ اقتصادی نیز بررسی شود. عوامل متعددی بر هزینهٔ تولید محصول تأثیر می‌گذارند که آن‌ها را به‌طورکلی به ۲بخش هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم تفکیک می‌کنیم و به شرح زیر به‌عنوان هزینه‌های کل محصول تعریف می‌شود [43]:

$$C_t = \text{Direct cost} + \text{Indirect cost} \quad (۱۲)$$

علاوه‌برآن، برای سرمایه‌گذاری در یک طرح باید میزان سرمایه، سود و مدت زمان بازگشت برآورد شود [44,45]. بازپرداخت سالانه به بانک و دوره بازگشت سرمایه از رابطهٔ (۱۳) و (۱٤) به‌دست می‌آید:

$$B = \frac{S \times u}{1 - \frac{1}{(1+u)^x}} \quad (۱۳)$$

$$t = \frac{C_t}{G_t} \quad (۱٤)$$

که در آن B بازپرداخت بانک در هر دوره (ریال)، s وام بانکی (ریال)، u بهره (درصد)، x مدت زمان بازپرداخت وام (سال) و t دوره برگشت سرمایه و G_t سود سالانه محصول است. در جدول (۲) خلاصه‌ای از هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم صرف‌شده برای ساخت خشک‌کن و خشک‌کردن محصول ارائه شده است.

جدول ۲ خلاصه‌ای از روند محاسبهٔ اقتصادی هزینهٔ تولید

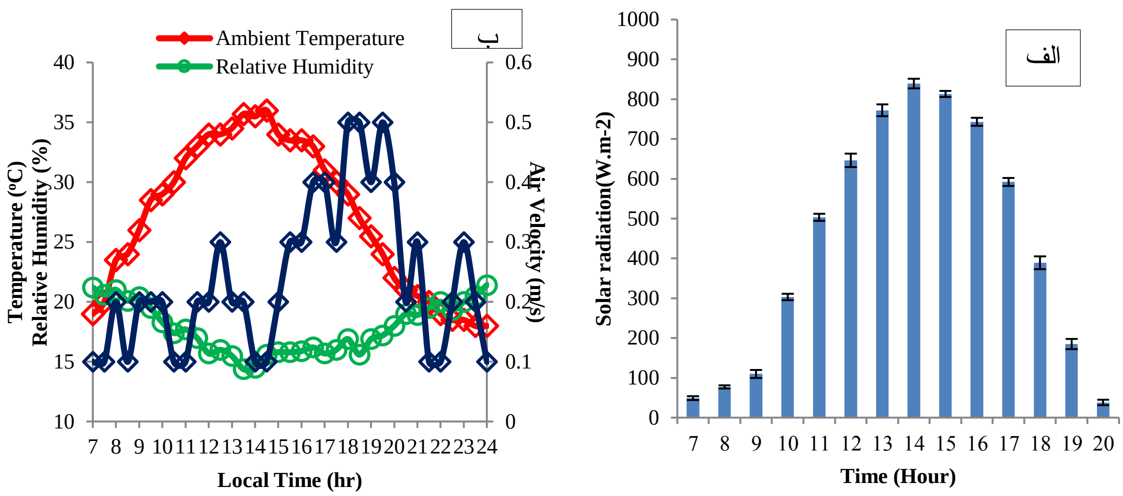
هزینهٔ کل تولید= هزینهٔ مستقیم + هزینه‌های غیرمستقیم	
هزینه‌های غیرمستقیم	هزینه‌های مستقیم
بسته‌بندی	قیمت مواد اولیه برای ساخت
حمل‌ونقل	هزینه اجرت ساخت و مونتاژ
بازاریابی و فروش	هزینهٔ برق مصرفی
بالاسری از ۱۰درصد مجموع هزینه‌های ساخت	هزینهٔ کار برای خشک‌کردن
-	قیمت محصول تازه

نتایج و بحث

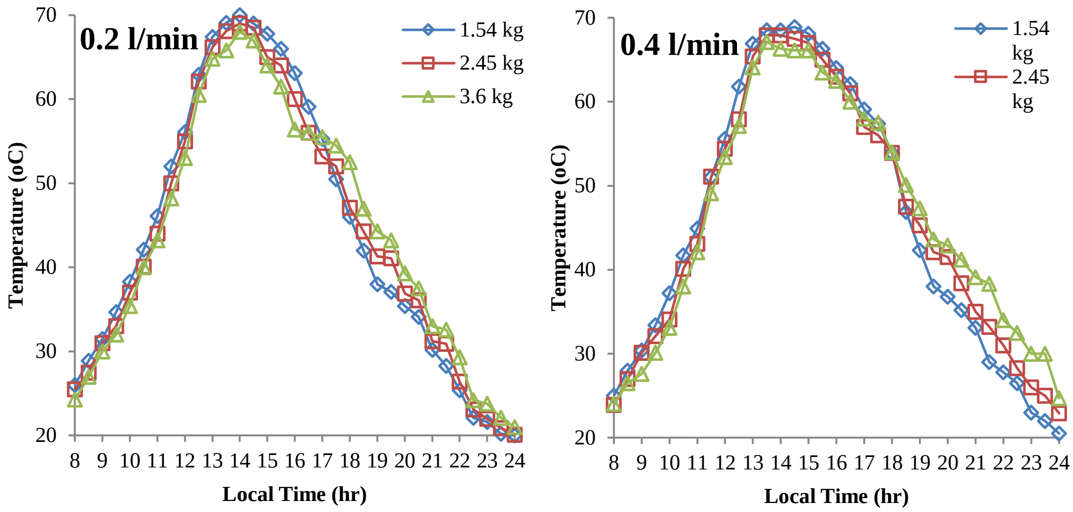
میانگین تغییرات شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان در روزهای آزمایش در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. میزان تغییرات شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایش جزئی بوده و این تغییرات تأثیر معنی‌داری بر روند خشک‌کردن نداشته است. میزان تابش خورشیدی از اوایل صبح (ساعت۷) با شدت ٤۹ وات بر مترمربع افزایش می‌یابد و در ساعات میانی روز (ساعت۱٤) به حداکثر مقدار خود، ۸۳۹ وات بر مترمربع می‌رسد. همچنین میزان تغییرات درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت هوای محیط به‌طور متوسط در ساعات خشک‌کردن محصول در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. برای خشک‌کردن مناسب محصول دمای زیاد و رطوبت نسبی کم در محیط آزمایش، ضروری است. باتوجه‌به نمودار، کمترین درجه حرارت محیط مربوط به ساعات آغازین فرایند خشک‌کردن است (۱۹درجه سلسیوس) و این درحالی است که رطوبت نسبی محیط در این ساعت در بیشینه مقدار خود است (۲۱/۲درصد). با افزایش شدت تابش، درجه حرارت محیط افزایش می‌یابد و رطوبت نسبی محیط کم می‌شود و روند خشک‌کردن محصول آسان می‌شود. بیشترین درجه حرارت محیط در ساعت۱٤:۳۰ اتفاق می‌افتد. اما شدت تابش خورشیدی در ساعت۱٤ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. به‌دلیل تأخیر بین تابش خورشیدی و جذب این تشعشعات به‌وسیلهٔ هوای محیط، دمای محیط با تأخیر نسبت به تابش خورشیدی افزایش می‌یابد [7]. همچنین باتوجه به شکل (۳-ب) می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سرعت هوا نوسانی بوده است و بین ۰/۱ تا ۰/۵متربرثانیه در ساعات خشک‌کردن تغییر می‌کند.

میزان تغییرات دمای خشک‌کردن در شرایط مختلف آزمایش به‌صورت تابعی از زمان در شکل (٤) نشان داده شده است. باتوجه‌به این‌که برای پایدارشدن دمای تمام مجموعه با محیط یک ساعت زمان در نظر گرفته شده بود، داده‌گیری فرایند خشک‌شدن از ساعت۸ صبح

شروع شد. برای ۲دبی سیال (۰/۲ و ۰/٤لیتربردقیقه) با افزایش شدت تابش خورشیدی، انرژی خورشیدی منتقل‌شده به سیال افزایش می‌یابد و در نتیجه دمای داخل کابینت خشک‌کن نیز افزایش می‌یابد. بیشترین درجه حرارت در داخل کابینت خشک‌کن در همهٔ شرایط بین ساعات۱۳ تا ۱۵ اتفاق می‌افتد که این مقدار برای دبی حجمی ۰/۲لیتربردقیقه از ٦٤/٨ تا ٦٩درجه سلسیوس و برای دبی حجمی ۰/٤لیتربردقیقه از ٦٦/١ تا ٦٨/٩درجه سلسیوس تغییر می‌کند. درجه حرارت خشک‌کن برای هنگامی که دبی سیال ۰/۲لیتربردقیقه است، به‌طور میانگین به‌اندازه ۱/٥ تا ۲/۳درجه سلسیوس بیشتر از هنگامی است که دبی سیال ۰/٤ باشد. علت این پدیده جذب سریع انرژی خورشیدی به‌وسیلهٔ سیال از جمع‌کننده خورشیدی است که در طولانی‌مدت انرژی حرارتی زیادی وارد خشک‌کن می‌شود و درجه حرارت سامانه را افزایش می‌دهد. برای هر ۲ دبی حجمی، درجه حرارت سیال برای هنگامی که میزان PCM، ۱/٥٤کیلوگرم است، بیشتر از بقیهٔ حالت‌ها (۲/٤٥ و ۳/٦ کیلوگرم) است و کمترین مقدار مربوط به PCM به‌میزان ۳/٦ کیلوگرم است. این امر به‌دلیل آن است که مقداری از انرژی حرارتی سیال که به‌وسیلهٔ جمع‌کننده خورشیدی لولهٔ خلأ جذب می‌شود، صرف افزایش دمای PCM و هم‌دماکردن آن با محیط اطراف می‌شود. این میزان انرژی جذب‌شده برای حالتی که PCM حجم بیشتری داشته باشد، افزایش می‌یابد و به‌تبع آن دمای سیال واردشده به خشک‌کن کم می‌شود [46]. این روند تا ساعت۱۸ یعنی زمانی که شدت تابش خورشیدی ۳۸۹ وات بر مترمربع است، ادامه پیدا می‌کند و پس از آن روند معکوس می‌شود و درجه حرارت خشک‌کن برای هنگامی که میزان PCM بیشتر است، نسبت به بقیهٔ حالت‌ها بیشینه می‌شود. این حالت برای هنگامی که دبی حجمی سیال ۰/٤ لیتربردقیقه است، به اندازهٔ یک ساعت زودتر اتفاق می‌افتد. علت این امر شاید به‌دلیل تخلیهٔ زودهنگام انرژی حرارتی از طریق سیال به خشک‌کن باشد. هرچند در ساعات پایانی روز به‌دلیل تخلیه سریع انرژی، درجه حرارت خشک‌کردن برای دبی ۰/٤ لیتربردقیقه سریع‌تر از ۰/۲ لیتربردقیقه اتفاق می‌افتد. این نتیجه با نتیجه محققان که در سامانه خود از PCM استفاده کرده بودند، مطابقت داشت [28,36].



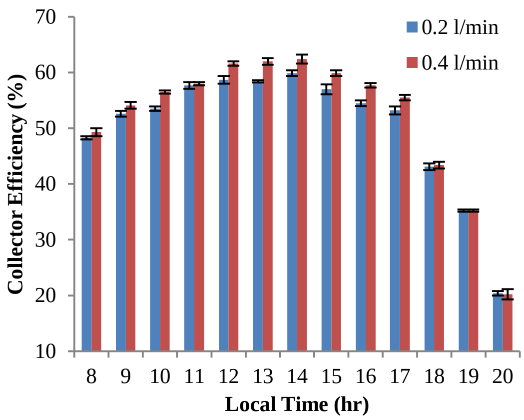
شکل ۳ تغییرات (الف) میانگین شدت تابش خورشیدی، (ب) میانگین درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت هوای محیط در زمان خشک‌کردن



(ب) (الف)

شکل ٤ تغییرات دمای خشک‌کن در وزن‌های مختلف از PCM در مخزن ذخیره‌کننده در ۲ دبی جرمی سیال، (الف) ۰/۲ و (ب) ۰/٤ لیتربردقیقه

میزان تغییرات بازده جمع‌کننده لولهٔ خلأ در شکل (٥) نشان می‌دهد که بازده جمع‌کننده با افزایش شدت تابش خورشیدی و مستقیم‌بودن پرتوهای تابش، افزایش می‌یابد و به حداکثر میزان خود می‌رسد. با کاهش شدت تابش خورشیدی، میزان انرژی جذب‌شده کم می‌شود و بازده جمع‌کننده نیز کاهش می‌یابد. میزان حجم PCM قرار گرفته در مخزن ذخیرهٔ سیال تأثیر معنی‌داری (۰/۰٥ P<) بر تغییرات بازده جمع‌کنندهٔ خورشیدی نداشت. بازده جمع‌کننده با افزایش دبی سیال جاری در خشک‌کن افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به‌دلیل تخلیهٔ بموقع انرژی حرارتی از جمع‌کننده و ایجاد فرصت برای جذب بیشتر انرژی خورشیدی به‌وسیلهٔ لوله‌های جمع‌کننده باشد [12,23,46]. بازده حرارتی جمع‌کننده هنگامی که دبی ۰/۲لیتربردقیقه باشد از ٥۹/۹درصد در اواسط روز تا ۲۰/٤درصد در انتهای روز تغییر می‌کند. این میزان برای دبی ۰/٤لیتربردقیقه از ٦۲/٤ تا ۲۰/۲درصد تغییر می‌کند.

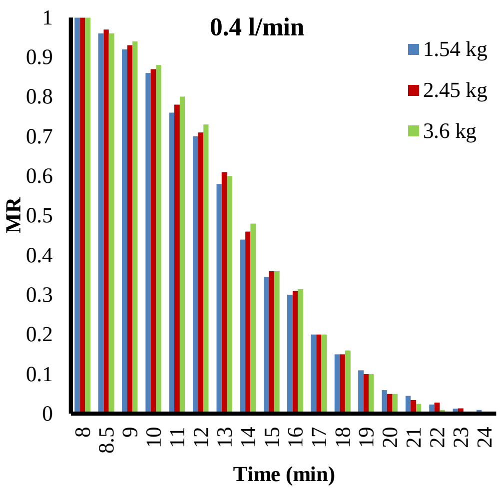


شکل ٥ تغییرات بازده جمع‌کننده لوله خلأ در دبی‌های ۰/۲ و ۰/٤ لیتربردقیقه در روزهای خشک‌کردن

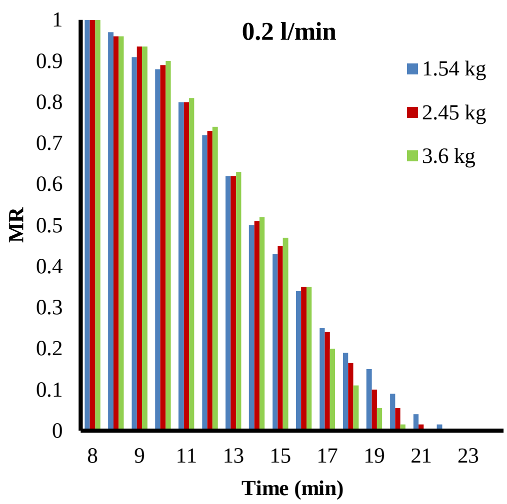
در شکل (٦) منحنی روند خشک‌شدن ورقه‌های سیب در شرایط مختلف بر حسب نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک‌شدن نشان داده شده است. باتوجه‌به نمودار با افزایش مقادیر PCM در داخل مخزن ذخیره‌کننده سیال، زمان خشک‌کردن محصول کم می‌شود. نسبت کاهش رطوبت محصول در ساعات

آغازین فرایند خشک‌کردن برای زمانی که میزان PCM، ۱/٥٤کیلوگرم است، بیشتر از هنگامی است که مقدار PCM، ۲/٤٥ و ۳/٦کیلوگرم است. این امر به‌دلیل جذب مقداری از انرژی حرارتی از طریق مواد تغییرفازدهنده است که البته پس از مدتی به تعادل می‌رسد و با افزایش شدت تابش خورشیدی این اثر ناچیز می‌شود. پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی، انرژی حرارتی واردشده به کابینت خشک‌کن کم می‌شود و میزان رطوبت‌گیری از محصول نیز کاهش می‌یابد [30,33]. اما با وجود PCM در مخزن، انرژی جذب‌شده رها و وارد چرخه خشک‌کردن محصول می‌شود. میزان انرژی آزادشده برای PCM با ۳/٦کیلوگرم بیشترین میزان بود. همچنین باتوجه‌به شکل (٦)، با افزایش دبی حجمی سیال، رطوبت خارج‌شده از محصول بیشتر و زمان خشک‌شدن کم می‌شود. علت این امر می‌تواند به‌دلیل جذب حداکثری انرژی حرارتی از جمع‌کننده خورشیدی به‌وسیلهٔ سیال باشد که علاوه بر جذب از طریق PCM وارد مبدل حرارتی و باعث خشک‌کردن نمونه‌ها با دمای بالا در خشک‌کن می‌شود.

در شکل (۷ – الف)، انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن خورشیدی به‌وسیلهٔ جمع‌کننده خورشیدی لولهٔ خلأ در شرایط مختلف با دبی‌های ۰/۲ و ۰/٤ لیتربردقیقه و PCM ۱/٥٤، ۲/٤٥ و ۳/٦ کیلوگرم نشان داده شده است. باتوجه‌به نمودار، با افزایش PCM در مخزن ذخیره‌کننده، میزان انرژی ذخیره‌شده افزایش می‌یابد و انرژی بیشتری از جمع‌کننده جذب می‌شود. همچنین باتوجه به نمودار با افزایش دبی سیال، انرژی حرارتی جذب‌شده نیز افزایش می‌یابد. تغییرات انرژی برای دبی ۰/۲ لیتربردقیقه از ۱۳/۳۱ تا ۱۳/٦۳مگاژول تغییر می‌کند و این تغییرات برای دبی ۰/٤لیتربردقیقه از ١٤/٤٥ تا ١٤/٩٢ مگاژول است. تأثیر دبی سیال بر انرژی خورشیدی بیشتر از تغییرات PCM است [29]. تغییرات بازده کلی خشک‌کن خورشیدی در شکل (۷ – ب) نشان می‌دهد که با افزایش PCM بازده نیز افزایش می‌یابد و مقدار آن برای دبی ۰/۲ لیتربردقیقه از ۳۲/۹۲ تا ۳۵/٥٥ درصد و برای دبی ۰/٤ لیتربردقیقه ۳۲/۱۹ تا ۳٦/۰۲ درصد متغیر است. بازده خشک‌کن خورشیدی با طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن محصول به‌دلیل افزایش توان مصرفی پمپ آب و دمندهٔ هوا کم می‌شود. در مقادیر یکسان برای PCM با افزایش دبی، بازده سامانه تغییر معنی‌داری پیدا نمی‌کند.

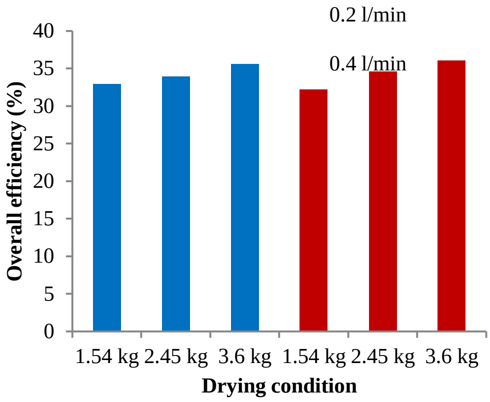


(الف)

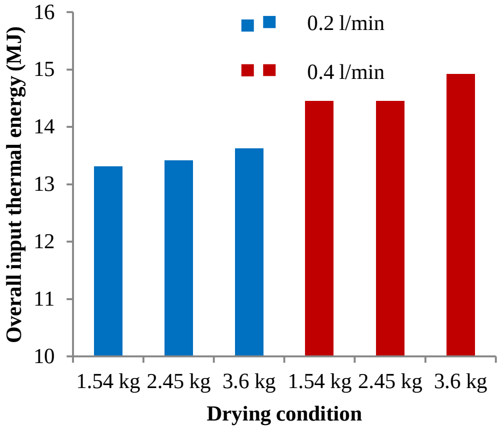


(ب)

شکل ٦ منحنی خشک‌شدن ورقه‌های سیب در PCM های مختلف و دبی‌های مختلف برای سیال ذخیره‌کننده

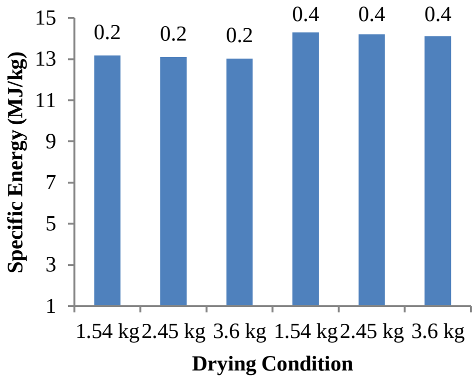


(الف)

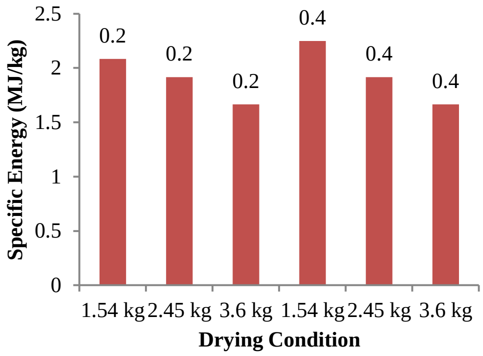


(ب)

شکل ۷ (الف) انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن به‌وسیلهٔ جمع‌کننده خورشیدی و (ب) بازده کل خشک‌کن خورشیدی در شرایط مختلف



(الف)



(ب)

شکل ۸ (الف) انرژی ویژهٔ خشک‌کردن ورقه‌های سیب در شرایط مختلف خشک‌کردن (ب) به‌ازای انرژی کل، ب) به‌ازای انرژی مکانیکی واردشده به خشک‌کن

در شکل (۸) تغییرات انرژی مصرف‌شده به‌وسیلهٔ خشک‌کن به‌ازای انرژی کل واردشده به سامانه، شامل انرژی حرارتی و انرژی مکانیکی، نشان داده شده است. با افزایش دبی حجمی سیال جریان‌یافته در سامانه و

مقدار PCM، انرژی حرارتی مصرفی برای خشک‌کردن یک کیلوگرم نمونه سیب افزایش می‌یابد. بیشترین میزان انرژی مصرفی در دبی حجمی ۰/٤لیتربردقیقه و PCM به‌میزان ۱/٥٤کیلوگرم اتفاق می‌افتد که این امر ممکن است به‌دلیل مصرف زیاد انرژی خورشیدی و انرژی مکانیکی در حین خشک‌کردن محصول باشد. انرژی مصرفی کل برای دبی حجمی ۰/۲لیتربردقیقه از ۱۳/۱۸درصد تا ۱۳/۰۲درصد و برای دبی حجمی ۰/٤لیتربردقیقه از ۱٤/۲۹ تا ۱٤/۱۰درصد با افزایش وزن PCM تغییر می‌کند. با مقادیر یکسان از PCM با افزایش دبی از ۰/۲ تا ۰/٤لیتربردقیقه، میزان انرژی مصرفی به‌دلیل استفاده بیشتر از انرژی مکانیکی برای به‌حرکت‌درآوردن سیال در سامانه، افزایش می‌یابد. روند تغییرات انرژی ویژه برای خشک‌کردن محصول با فرض این‌که انرژی خورشیدی به‌صورت رایگان و فراوان در دسترس است و فقط با درنظرگرفتن انرژی الکتریکی مصرفی از طریق سامانه نمایش داده شده است. روند تغییرات مانند شکل (۸–الف) است و میزان تغییرات انرژی الکتریکی مصرفی برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب با دبی حجمی ۰/۲لیتربردقیقه از ۲/۰۸ تا ۱/٦۷مگاژول بر کیلوگرم و برای دبی حجمی ۰/٤لیتربردقیقه از ۲/۲٥ تا ۱/٦۷مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد. باتوجه‌به شرایط ذکرشده و فراوانی انرژی خورشیدی در منطقه، می‌توان اذعان کرد که سامانهٔ خشک‌کن با دبی حجمی ۰/۲لیتربردقیقه و مقدار PCM به‌میزان ۳/٦کیلوگرم حالت مناسبی برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب باشد. نتیجهٔ به‌دست‌آمده با نتیجهٔ گزارش‌شده از خشک‌کن خورشیدی [7,13,21] مطابقت داشت.

همان‌گونه که اشاره شد، یکی از عوامل کلیدی در انتخاب یک خشک‌کن، هزینه‌های تمام‌شده و بررسی اقتصادی آن است. چه‌بسا محصولی با روش‌های مختلف و با صرف انرژی کم و بازده زیاد خشک شود، اما اگر کیفیت محصول تولیدی یا بازارپسندی محصول کم باشد، در آن صورت نه‌تنها سودی عاید تولیدکننده نخواهد شد، بلکه با فروش نامناسب و برنگشتن سرمایه، تولیدکننده بدون آن‌که متوجه شود، در بلندمدت متضرر خواهد شد. در تحقیق حاضر محاسبات اقتصادی روی خشک‌کن خورشیدی انجام شد که خلاصهٔ آن در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۳ آنالیز اقتصادی خشک‌کن خورشیدی و زمان بازگشت سرمایه

پارامتر اقتصادی	مقدار
سود وام (درصد)	٤
سرمایه‌گذاری اولیه (تومان)	٥،۰۰۰،۰۰۰
عمر مفید خشک‌کن (سال)	۱٥
هزینهٔ کارگری و برق مصرفی سالیانه (تومان)	٤۱،۹۲۸
اقساط سالانه (تومان)	۱،۱۲۳،٥۹٥
هزینهٔ بسته‌بندی، بازاریابی و فروش (تومان)	۲۳٥،۰۰۰
قیمت محصول تازه (تومان)	٥،۰۰۰
قیمت محصول فراوری‌شده (تومان)	۳٥،۰۰۰
دورهٔ بازگشت سرمایه (سال)	۱/٦۷ (معادل ۲۰ ماه)

باتوجه‌به این‌که ظرفیت خشک‌کن خورشیدی در شرایط مناسب (دبی حجمی ۰/۲ لیتربردقیقه و مقدار PCM به‌میزان ۳/٦ کیلوگرم) ۲ کیلوگرم در روز است، با درنظرگرفتن محتوای رطوبت نهایی محصول خارج‌شده از این دستگاه، ٥٦٦ گرم سیب خشک در روز تولید می‌شود. لازم به ذکر است که با درنظرگرفتن شدت تابش خورشیدی بهینه در منطقه، فرض شده است که این خشک‌کن فقط در ٦ماه از سال می‌تواند عملیات خشک‌کردن را انجام دهد (زمانی که تولید محصول انبوه بوده است و نیاز به خشک‌کردن بیشتر احساس می‌شود). در این مدت می‌توان حدود ۱۰۲کیلوگرم سیب را با خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم تولید کرد. برای این ٦ماه هزینه خرید محصول تازه ۱،۸۰۰،۰۰۰تومان، هزینه مصرف برق ۲٦،۹۲۸ تومان و هزینه بسته‌بندی، بازاریابی و فروش ۲۳۵،۰۰۰ تومان برآورد شد. بنابراین سود ٦ ماه سال برابر با ۱،٥۰۳،۸۷۲ تومان است. باتوجه‌به روابطهٔ (۱۱) و (۱۲) که شرح آن‌ها داده شد، سود ٦ ماه سال از این مقدار ۱،٥۰۳،۸۷۲تومان و سرمایه کل مورد نیاز برای برآورده‌شدن این مقدار تولید ٥،۰۰۰،۰۰۰ تومان خواهد بود. براین‌اساس و با درنظرگرفتن عمر مفید دستگاه، میزان بازگشت سرمایه ۲۰ماه به‌دست آمد. هزینهٔ سامانه‌های خورشیدی به‌ویژه خشک‌کن‌های خورشیدی به‌دلیل هزینهٔ اولیه که برای ساخت در نظر گرفته می‌شود، عمدتا زیاد است و بازگشت سرمایهٔ آن‌ها همیشه بین ۳۰ ماه در بهترین شرایط تا ۷۲ ماه در بدترین شرایط را دارد. هرچند به‌صورت ترکیبی دوره بازگشت تا ۱۲ماه نیز کم می‌شود [6,43]. دوره بازگشت سرمایهٔ سیستم حاضر نشان می‌دهد خشک‌کن استفاده‌شده تا حدودی توانسته است محصولی با قیمت مناسب به بازار عرضه کند. لازم به یادآوری است که باتوجه به شرایط آب‌وهوایی کرمان، در کل سال با تغییراتی مانند هیبریدکردن می‌توان کارایی سامانه را افزایش داد و زمان بازگشت سرمایه را کم کرد. ارزیابی اقتصادی خشک‌کن خورشیدی ترکیبی (حالت گلخانه‌ای با جمع‌کننده خورشیدی) ساخته‌شده برای خشک‌کردن انگور و فلفل قرمز نشان داد که زمان بازگشت سرمایه برای بازهٔ چهارماهه ۳/۲ سال و برای حالت مستقل (فقط جمع‌کننده) ٤۲ ماه است [6]. در تحقیق مشابه میزان بازگشت سرمایه برای یک خشک‌کن خورشیدی که برای خشک‌کردن علف‌های هرز دریایی استفاده شده بود، با احتساب کل سال ۲/۳۳ به‌دست آمد [49]. بازگشت سرمایه برای خشک‌کردن محصول در کشور هند با احتساب ۸ ماه از سال برای خشک‌کردن ۱/٥سال به‌دست آمد. در این خشک‌کن از سامانهٔ ذخیره‌کننده انرژی استفاده شده بود [31].

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد خشک‌کن خورشیدی مجهز به جمع‌کننده لولهٔ خلأ همراه با PCM ارزیابی شد. خشک‌کن خورشیدی شامل جمع‌کنندهٔ لولهٔ خلأ، مخزن ذخیره‌کننده، مواد تغییرفازدهنده، مبدل حرارتی و خشک‌کن کابینتی بود. برای ارزیابی جمع‌کننده و خشک‌کن، آزمایش‌ها با مواد تغییرفازدهنده در ۳جرم ۱/٥٤، ۲/٤٥ و ۳/٦ کیلوگرم و دبی حجمی سیال جریان‌یافته در سامانه در ۲ سطح ۰/۲ و ۰/٤لیتربردقیقه در روزهای متوالی در تیرماه ۹٦ انجام شد. با افزایش شدت تابش خورشید، دمای ورودی به کابینت خشک‌کن افزایش می‌یابد و با گذشت زمان و نزدیک‌شدن به غروب خورشید کم می‌شود. در طول روز، زمانی که شدت تابش خورشیدی بیشینه است، انرژی حرارتی جذب‌شده به‌وسیلهٔ جمع‌کننده خورشیدی در سیال و PCM ذخیره می‌شود و در طول شب زمانی که تابش خورشیدی وجود ندارد استفاده می‌شود و به‌تبع آن فرایند خشک‌کردن ادامه می‌یابد. بازده حرارتی جمع‌کننده برای دبی سیال ۰/۲ و ۰/٤لیتربردقیقه به‌ترتیب بین ٥۹/۹ و ٦۲/٤درصد در اواسط روز تا ۲۰/٤ و ۲۰/۲درصد در انتهای روز تغییر می‌کند. تغییرات انرژی برای دبی حجمی سیال ۰/۲لیتربردقیقه از ۱۳/۳۱ تا ۱۳/٦۳مگاژول تغییر می‌کند و این مقدار برای دبی

حجمی ۰/۴لیتربردقیقه از ۱۴/۴۵ تا ۱۴/۹۲مگاژول به‌دست آمد. تغییرات بازده کلی خشک‌کن خورشیدی نشان می‌دهد که با افزایش PCM، بازده افزایش می‌یابد و مقدار آن برای دبی ۰/۲لیتربردقیقه از ۳۲/۹۲ تا ۳۵/۵۵درصد و برای دبی ۰/۴لیتربردقیقه ۳۲/۱۹ تا ۳۶/۰۲درصد متغیر است. میزان تغییرات انرژی الکتریکی مصرفی برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب با افزایش دبی حجمی افزایش می‌یابد. باتوجه‌به فراوانی و رایگان‌بودن انرژی خورشیدی نیز می‌توان نتیجه گرفت که سامانهٔ خشک‌کن با دبی ۰/۲لیتربردقیقه و مقدار PCM به‌میزان ۳/۶کیلوگرم گزینه مناسبی برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب است. تحلیل اقتصادی خشک‌کن خورشیدی نشان داد که مدت بازگشت سرمایه با درنظرگرفتن ۶ماه از سال برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب، ۲۰ماه است که در محدودهٔ مناسب است.

واژه نامه

علائم انگلیسی

A	مساحت کلکتور، mm
B	بازپرداخت بانک در هر دوره
c_l	ظرفیت گرمایی ویژه در حالت مایع، J/kg.K
c_s	ظرفیت گرمایی ویژه ئر حالت جامد، J/kg.K
E_{mec}	انرژی مکانیکی مصرف شده توسط فن و پمپ آب، J
FR	ضریب انتقال گرمای جمع‌کننده
G_t	سود سالانه محصول
h_c	ضریب انتقال حرارت همرفتی، W/m^2 K
$I_{b,T}$	شدت تابش خورشیدی، W/m^2
k_w	ضریب هدایت حرارتی مس، W/m K
Me	محتوای رطوبت در حالت تعادل، kg water/kg dry solid
Mo	محتوای رطوبت اولیهٔ محصـــول، kg water/kg dry solid
Mt	محتوای رطوبت در هر لحظه، kg water/kg dry solid
Q_{pcm}	انرژی حرارتی ذخیره شده در ماده PCM، J
Q_f	انرژی حرارتی سیال، J
Q_m	استخراج رطوبت از محصول، J
S	وام بانکی (ریال)
$T_{f,m}$	دمای متوسط سیال، k
$T_{c,m}$	دمای دیوارهٔ مسی، k
T_{pcm}	درجه حرارت ماده PCM، k
T_a	دمای محیط، k
T_i	دمای خروجی سیال از جمع کننده، k
t	دوره بازگشت سرمایه
tc	ضخامت دیوارهٔ لولهٔ مسی مارپیچ، m
u	بهره (درصد)
UL	اتلاف حرارت کلی از جمع کننده، W/m^2K
x	مدت زمان بازپرداخت وام(سال)

علائم یونانی

τ	ضریب عبور
α	ضریب جذب
η	بازده جمع کننده

مراجع

1. Salami, P., "Design and construction of the PVT system to increase the energy efficiency of solar flat plate collector", Ph.D. Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran, (2016).
2. Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M., and Tarmahi, H., "Modelling and drawing energy and exergy of solar radiation", *International Journal of Exergy*, Vol. 19.4, pp. 544-568, (2016).
3. Ghasemkhani, H., Keyhani, A., Aghbashlo, M., and Rafiee, S., Mujundar, A., "Improving exergetic

performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 94, pp. 13-23, (2016).

4. Akhijani, Samimi, H., Arabhosseini, A., and Kianmehr, M. H., "Effective moisture diffusivity during hot air solar drying of tomato slices", *Research in Agricultural Engineering*, Vol. 62.1, pp. 15-23, (2016).
5. Panwar, N. L., Kaushik, S. C., and Surendra, K., "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15.3, pp. 1513-1524, (2011).
6. ELkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., and Faraht, A., "Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape", *Renewable Energy*, Vol. 77, pp. 1-8, (2015).
7. Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., and Abdulrahman, O. A., "Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips", *Renewable Energy*, Vol. 116, pp. 594-605, (2018).
8. Perumal, R., "Comparative performance of solar cabinet, vacuum assisted solar and open sun drying methods", Diss. McGill University, (2007).
9. Khouya, A., and Draoui, A., "Computational drying model for solar kiln with latent heat energy storage: Case studies of thermal application", *Renewable Energy*, Vol. 130, pp. 796-813, (2019).
10. Fleming, A., Folsom, C., Ban, H., and Ma, Z., "A general method to analyze the thermal performance of multi-cavity concentrating solar power receivers", *Solar Energy*, Vol. 150, pp. 608-618, (2017).
11. Mortezapour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., and Minaee, S., "Drying kinetics and quality characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer", *Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 16, pp.33-45, (2014).
12. Abokersh, M. H., El-Morsi, M., Sharaf, O., and Abdelrahman, W., "An experimental evaluation of direct flow evacuated tube solar collector integrated with phase change material", *Energy*, Vol. 139, pp. 1111-1125, (2017).
13. Motevali, A., "Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.]", TarbiatModares University, Tehran, Iran, (2013).
14. Motahayyer, M., Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., and Khashechi, M., "Application of computational fluid dynamics in optimization design of absorber plate of solar dryer", *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, Vol. 49 (2), pp. 285-294, (In Persian), (2018).
15. Sharafeldin, M. A., and Gyula G., "Evacuated tube solar collector performance using CeO2/water nanofluid", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 185, pp. 347-356, (2018).
16. Samimi-Akhijahani, H., and Arabhosseini. A., "Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system", *Renewable Energy*, Vol. 123, pp. 428-438, (2018).
17. FAOSTAT Statistics Database, FAO, (2016).

18. Morrison, G. L., Budihardjo, I., and Behnia, M., "Water-in-glass evacuated tube solar water heaters", *Solar Energy*, Vol. 76.1-3, pp. 135-140, (2004).
19. Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S., and Mahian, O., "Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1038-1054, (2015).
20. Tong, Y., and Honghyun Ch., "Comparative study on the thermal performance of evacuated solar collectors with U-tubes and heat pipes", *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 23.03, pp. 1550019, (2015).
21. Sundari, AR. U., Neelamegam, P., and Subramanian, C. V., "Performance evaluation of a forced convection solar drier with evacuated tube collector for drying Amla", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, pp. 2853-2858, (2013).
22. Rajagopal, T., Sivakumar, S., and Manivel, R., "Development of solar dryer incorporated with evacuated tube collector", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 3.3, pp. 2655-2658, (2014).
23. Lamnatou, Ch., Papanicolou, E., Belessiotis, V., and Kyriakis, N., "Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector", *Applied Energy*, Vol. 94, pp. 232-243, (2012).
24. Ersöz, M. A., "Effects of different working fluid use on the energy and exergy performance for evacuated tube solar collector with thermosyphon heat pipe", *Renewable Energy*, Vol. 96, pp. 244-256, (2016).
25. Kim, Y., and Taebeom, S., "Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube", *Renewable Energy*, Vol. 32.5, pp. 772-795, (2007).
26. Mahendran, M., Ali, T. Z. S., Shahrani, A., and Bakar, R. A., "The efficiency enhancement on the direct flow evacuated tube solar collector using water-based titanium oxide nanofluids", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 465, pp. 308-315, Trans Tech Publications Ltd, (2014).
27. Tay, N. H. S., Bruno, F., and Belusko, M., "Experimental validation of a CFD model for tubes in a phase change thermal energy storage system", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55.4, pp. 574-585, (2012).
28. Rabha, D. K., and Muthukumar, P., "Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax–based latent heat storage system", *Solar Energy*, Vol. 149, pp. 214-226, (2017).
29. Shalaby, S. M., Bek, M. A., and El-Sebaii, A. A., "Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, pp. 110-116, (2014).
30. Shalaby, S. M., and Bek, M. A., "Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium", *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 3.3, pp. 176-180,

(2015).

31. Jain, D., and Pratibha, T., "Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage", *Renewable Energy*, Vol. 80, pp. 244-250,(2015).
32. Hamada, Y., and Jun, F., "Latent heat thermal energy storage tanks for space heating of buildings: comparison between calculations and experiments", *Energy Conversion and Management*, Vol. 46.20, pp. 3221-3235, (2005).
33. Belusko, M., and Bruno, F., "Design methodology of PCM thermal storage systems with parallel plates", EUROSUN, (2008).
34. Riffat, S. B., and Gan, G., "Determination of effectiveness of heat-pipe heat recovery for naturally-ventilated buildings", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18.3-4, pp. 121-130, (1998).
35. Wang, T. y., Diao, Y. h., Zhu, T. t., Shao, Y. h., Liu, J., and Wei, X. q., "Thermal performance of solar air collection-storage system with phase change material based on flat micro-heat pipe arrays", *Energy Conversion and Management*, Vol. 142, pp. 230-243, (2017).
36. Esakkimuthu, S., Hassabou, A. H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., and Velarj, R., "Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications", *Solar Energy,* Vol. 88, pp. 144-153, (2013).
37. Liu, M., Wasim, S., and Frank, B., "Validation of a mathematical model for encapsulated phase change material flat slabs for cooling applications", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31.14-15, pp. 2340-2347, (2011).
38. Fortunato, B., Camporeale, S. M., Torresi, M., and Albano, M., "Simple mathematical model of a thermal storage with PCM", *AASRI Procedia*, Vol. 2, pp. 241-248, (2012).
39. Hed, G., and Rickard, B., "Mathematical modelling of PCM air heat exchanger", *Energy and Buildings*, Vol. 38.2, pp. 82-89, (2006).
40. Esen, M., Durmuş, A., and Durmuş, A., "Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials", *Solar Energy*, Vol. 62.1, pp. 19-28, (1998).
41. Vieira, M. G. A., Estrella, L., and Rocha, S. C. S., "Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp", *Drying Technology*, Vol. 25.10, pp. 1639-1648, (2007).
42. Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., and Kazem, H. A., "Performance analysis of solar drying system for red chili", *Solar Energy,* Vol. 99, pp. 47-54, (2014).
43. Ziotis, N., and Papadas, Ch. T., "Supply of money and food prices: The case of Greece", *Agricultural Economics Review*, Vol. 12, (2011).
44. Pulford, A. L., "monetary factors and the us retall food price level", (2012).
45. Akhijahani, Samimi, H., Arabhosseini, A., and Kianmehr., M. H., "Comparative quality assessment of different drying procedures for plum fruits (Prunus domestica L.)", *Czech Journal of Food Sciences*,

Vol. 35.5, pp. 449-455, (2017).

46. Feliński, P., and Sekret, R., "Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM", *Energy*, Vol. 114, pp. 1063-1072, (2016).
47. Iranmanesh, Masoud, Hadi Samimi Akhijahani, and Mohammad Saleh Barghi Jahromi., "CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system", *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1192-1213, (2020).
48. Iranmanesh, M., and Barghi Jahromi., "Effect of forced convection and PCM materials on an indirect solar dryer equipped with evacuated heat pipe collector", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19.11, PP. 2607-2614, (2019).
49. Fudholi, A., Ruslan, M. H., Yahya, M. A., and Zaharim, A., "Technoeconomic analysis of solar drying system for seaweed in Malaysia", Proc. of the 7th IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD, 11), Vol. 11, PP. 89-95, (2011).

Evaluation of Thermo-Economic Cabinet Solar Dryer with Evacuated Heat Pipe Collector and Energy Storage

Mohammad Saleh Barghi Jahromi[2]
Masoud Iranmanesh[3] Hadi Samimi Akhijahani[4]

1. Introduction

One of the main axes in the field of energy is the energy efficiency of energy supplying systems. As Iran is a country that due to the abundance of fossil fuels, less attention is paid to how to consume energy and optimize energy consuming systems. However, in recent decades, due to the depletion of fossil fuel sources and pollution that comes from consumption of this type of energy sources, the comprehensive development document of the country stipulates that by 2051 at least 30% of the electricity generation network must be provided from new and renewable energy sources, of which more than 15% will be from solar energy. Therefore, designing and building systems that can use new and renewable energy independently or in combination is important and necessary. More than 30% of the world's energy production is used in agriculture, of which about 12% is used to dry agricultural products. The use of fossil fuels causes environmental problems such as greenhouse gases and air pollution. The use of solar dryers can greatly prevent the consumption of fossil fuels in this area. Moreover, the quality of the dried product increases and the environmental pollution decreases considerably. In this research, using laboratory data, the drying process of the product using apple slices was evaluated and the thermal efficiency of the storage tank and the drying efficiency were obtained and the required volume and mass flow rate were obtained to get the highest thermal efficiency.

2. Experimental Setup

The dryer used in this research is a cabinet dryer including a vacuum tube solar collector, storage source with PCM, heat exchanger, electric fan and dryer cabinet. Vacuum tube collector (SK-H15-45) consists of 15 double-walled tubes with a length of 1800 mm, with an effective area of 1.9 m^2 with a copper absorber with internal and external diameters of 45 and 58 mm. The schematic of the drying system assisted with collector, cabinet and storage system is depicted in Figure 1. The fluid flow rate at two levels of 0.2 and 0.4 l/min and three levels of PCM mass 1.54, 2.45 and 3.6 kg were considered to do the experiments.

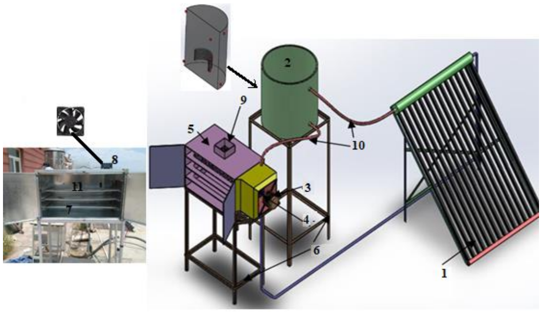


Figure 1. Details of cabinet solar dryer including: 1) vacuum tube collector, 2) fluid storage tank, 3) air blower fan, 4) heat exchanger, 5) dryer cabinet, 6) chassis, 7) sample tray, 8) electric fan controller, 9) output, 10) fluid transfer tube, 11) thermocouples

3. Solar Collector and Drying Efficiency

The energy absorbed during the heating process consists of two parts: the first part of the container is the PCM, the copper coil tube, and the second part, paraffin. Figure 2 shows the heat circuit of an energy storage source including fluid, adsorbent, and adsorbent (copper) shell. Heat is transferred by the fluid through convection to the copper wall and then through conduction to paraffin inside the helical tube. In this case, the heat transferred from the solar collector is stored or released by the fluid and paraffin. Dryer efficiency was used to describe the effect of using PCM and thermal energy storage system on the drying process of the product. The ratio of energy (thermal and mechanical) used to heat the product and extract moisture from the product to the total energy used during the drying process, including fluid thermal energy and mechanical energy as the drying efficiency considered to calculate drying efficiency.

4. Results and Discussion

The rate of change of drying temperature under different test conditions as a function of time is shown in Figure 2. Due to the fact that it took one hour to stabilize the temperature of the whole set with the environment, the data collection of the

2. MSc Student, Renewable Energy and Energy Conversion Research Department, Graduate University of Industrial and Advanced Technology, Kerman.
3. Assistant Professor, Renewable Energy and Energy Conversion Research Department, Graduate University of Industrial and Advanced Technology, Kerman.
4. Corresponding author. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan. Email: h.samimi@uok.ac.ir

drying process started at 8:00 AM. For two fluid discharges (0.2 and 0.4 l/min) as the intensity of solar radiation increases, the solar energy transferred to the fluid increases and as a result the temperature inside the dryer cabinet increases.

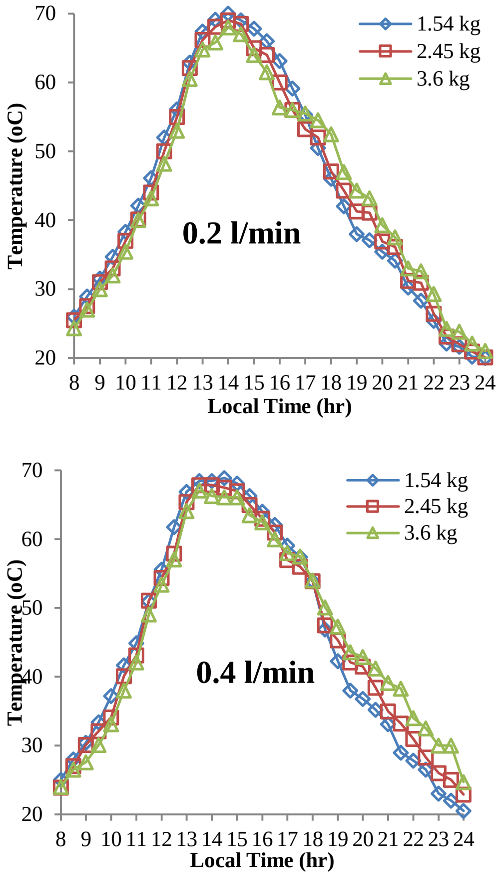


Figure 2. Dryer temperature changes at different weights of PCM in the storage tank at two fluid flow rates, 0.2 and 0.4 l/min

Figure 3 shows the thermal energy input to the solar dryer by the vacuum tube solar collector in different conditions with flows of 0.2 and 0.4 l/min and PCM 1.54, 2.45 and 3.6 kg. Changes in the overall efficiency of the solar dryer in Figure 7 as well. It shows that with increasing PCM, the efficiency also increased and its value for flow of 0.2 l/min from 32.92 to 35.55 percent and for flow of 0.4 l/min varies from 32.19 to 36.02%.

The rate of change of electrical energy used for drying apple slices increases with increasing volumetric flow rate, and considering the abundance and freeness of solar energy, it can be concluded that the drying system with a flow rate of 0.2 l/min and the amount of PCM to 3.6 kg is a good option for drying apple slices.

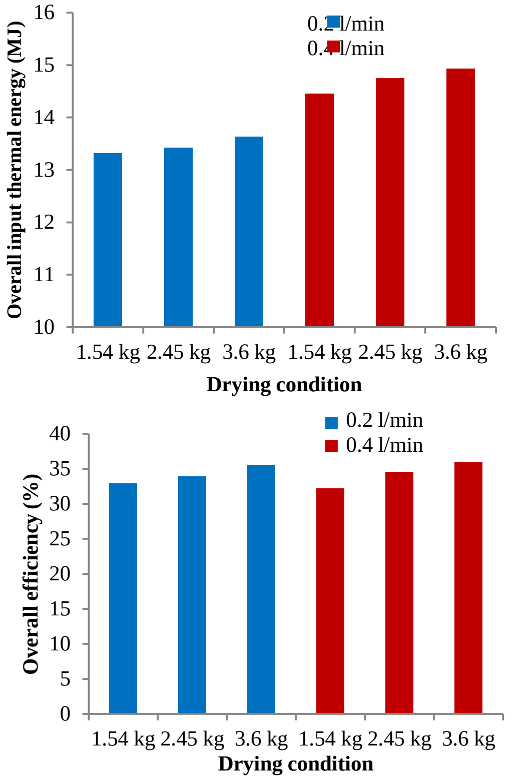


Figure 3. Thermal energy input to the dryer by solar collector and total efficiency of the solar dryer in different conditions

5. Conclusion

In this study, the performance of a solar dryer equipped with a vacuum tube collector with PCM was evaluated. To evaluate the collector and dryer, experiments with phase change materials in three masses of 1.54, 2.45 and 3.6 kg and volumetric flow of fluid flowing in the system at two levels of 0.2 and 0.4 l/min was performed on continues days in July 2017. During the day, when the intensity of solar radiation is maximum, the heat energy absorbed by the solar collector is stored in fluid and PCM, and is used during the night when there is no solar radiation, and consequently the drying process continued. Collector thermal efficiency for the fluid flow of 0.2 and 0.4 l/min varies between 59.9 and 62.4% in the middle of the day to 20.4 and 20.2% at the end of the day, respectively. Energy changes for fluid volume flow of 0.2 l/min vary from 13.31 to 13.63 MJ, and this value for volume flow rate of 0.4 l/min from 14.45 to 14.92 MJ. Changes in the overall efficiency of the solar dryer show that with increasing PCM, the efficiency increases and its value for 0.2 l/min from 32.92 to 35.55 % and for flow of 0.4 l/min it varies from 32.19 to 36.02%. The economic analysis of the solar dryer showed that the return period of the investment, considering six months of the year for drying apple slices, is 20 months, which is within the acceptable range.